

ESTIMACION DEL HIDROGRAMA DE CRECIDA A PARTIR DE UN MODELO CONCEPTUAL DE BASE GEOMORFOLOGICA

Por: Ana María Camarasa Belmonte, Geógrafa. Departamento de Geografía. Universidad de Valencia, Rafael García Bartual, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.

1. INTRODUCCION

Las leyes de la mecánica de fluidos fundamentan diversos métodos de la ingeniería hidráulica. En el estudio y cuantificación de los fenómenos de avenida, el uso de ecuaciones fundamentales ha encontrado, sin embargo, dificultades insalvables. La compleja geometría de las cuencas fluviales, la multitud de factores intervinientes en la formación de la escorrentía y la rudimentaria información sobre la intensidad de lluvia -con variaciones casi caóticas en el espacio y en el tiempo-, o sobre el comportamiento hidrológico de los suelos, explican la dificultad de aplicar aproximaciones determinísticas. No sorprende por ello que la teoría de sistemas y los métodos estadísticos hayan resultado alternativas

metodológicas especialmente fructíferas.

La complejidad de variables físicas concurrentes en las avenidas explican en parte la ausencia de métodos universales o «siempre mejores» que otros. En la práctica el ingeniero o el hidrólogo se encuentra con innumerables aproximaciones y combinaciones de metodologías de las que rara vez conoce su grado de fiabilidad. Cierta procedimiento especialmente indicado para determinado tipo de cuencas, puede dar resultados nefastos en cuencas de diferente tamaño, topografía, vegetación o entorno climático.

La aplicación de la amplia gama de metodologías para el estudio cuantitativo de crecidas representa siempre una solución de compromiso, a adoptar en función de los obje-

RESUMEN

El presente artículo muestra un ejemplo de aplicación de la teoría del hidrograma unitario, determinando y contrastando el hidrograma de la crecida ocasionada por una precipitación intensa sobre una pequeña cuenca instrumentada cercana a Valencia.

Dentro del planteamiento general de esta teoría, se ilustra el interés del uso de parámetros descriptores de la estructura de la red de drenaje, en la definición del hidrograma unitario instantáneo.

Palabras Clave: AGUA SUPERFICIAL, AVENIDA, CAUDALES ESTUDIO, ESCORRENTIA

SUMMARY

*ESTIMATE OF GROWTH
HYDROGRAPH STARTING
FROM A GEOMORPHOLOGY
BASED CONCEPTUAL MODEL*

This paper shows an application of the geomorphologic unit hydrograph theory over a small catchment located in the South East of Spain.

The results obtained in the estimation of the hydrograph produced by an intense storm, show good agreement with measured hydrograph. The interest of using morphometric indexes describing drainage net structure in such approximations is emphasized.

Keywords: SURFACE WATER, FLOOD, FLOW RATES, STUDY, SURFACE RUN-OFF.

tivos, la información hidrológica y los medios de cálculo disponibles. De hecho existen innumerables opciones para dar respuesta a un determinado problema, desde el método racional -presentado hace más de un siglo y utilizado aún de forma extensa- hasta los últimos sofisticados modelos matemáticos de simulación que requieren abundante información física de la cuenca y su respuesta hidrológica.

En estas condiciones, el análisis pormenorizado de un cierto suceso o crecida puede representar una vía fructífera para contrastar una metodología concreta, profundizar en el conocimiento de los procesos de generación de la escorrentía y formación de la crecida, y, en definitiva, mejorar las bases para la estimación práctica de los hidrogramas.

En esta línea, la presente investigación ilustra las posibilidades que ofrece la teoría del hidrograma unitario. La formulación teórica se acompaña con la aplicación a una avenida registrada el día 11 de noviembre de 1988 en una subcuenca de la Rambla de Poyo (Valencia). La subcuenca (187 km²) reviste particular interés por su capacidad de generar en poco tiempo súbitas puntas de caudal, con un funcionamiento de tipo «Flash-flood» (DURAN et al., 1985).

El hidrograma registrado en la estación de aforo el citado día, se contrasta con el estimado teóricamente a partir de la aplicación de un modelo conceptual de respuesta de la cuenca, basado en la teoría lineal de los sistemas hidrológicos. De acuerdo con ésta, la cuenca constituye un sistema transformador de lluvia-escorrentía, lo cual define un marco conceptual en el que, como se ilustra en esta investigación, tienen cabida diversas aproximaciones e hipótesis susceptibles de elección según la naturaleza del caso abordado. Los resultados obtenidos ilustran una satisfactoria capacidad

de predicción del modelo, así como el alcance de la teoría de sistemas para el cálculo del hidrograma de una crecida a partir del hietograma de lluvia observado.

2. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACION DEL HIDROGRAMA

El concepto de hidrograma unitario, introducido por Sherman (1932), es susceptible de reformularse en términos de la Teoría de Sistemas (DOOGE, 1959). Dicha formulación supuso un importante avance en la hidrolología, por cuanto permite estimar numéricamente el hidrograma generado por una determinada precipitación en una cuenca. El esquema conceptual aplicado, que conduce a una función Q(t) de caudales circulantes en el punto de desagüe de la cuenca, se muestra en la figura 1.

Es decir, la cuenca como sistema transformador, opera sobre unos INPUTs hidrológicos (lluvia) dando lugar a unos OUTPUTs o salidas (hidrograma de la crecida).

Conforme a este simple esquema, el proceso de generación de caudal puede sintetizarse matemáticamente a través de las dos operaciones de transformación (1) y (2) indicadas en la figura 1, y las funciones siguientes:

i(t): Intensidad de precipitación media sobre la cuenca en el instante 't'.

ø(t): Tasa instantánea de pérdidas (cantidades de agua por unidad de tiempo y área que no pasan a formar parte de la escorrentía de superficie).

Q(t): Caudal en el punto de desagüe, en el instante 't'.

Si la operación de transformación (2) se supone lineal e invariante temporalmente, siguiendo el resultado fundamental de la teoría de sistemas lineales, puede describirse mediante la ecuación de convolución. Esta traduce a términos matemáticos los principios básicos del hidrograma unitario (JOHNSTONE y CROSS, 1949):

$$Q(t) = A \int_0^t i_e(x) u(t-x) dx \quad [1]$$

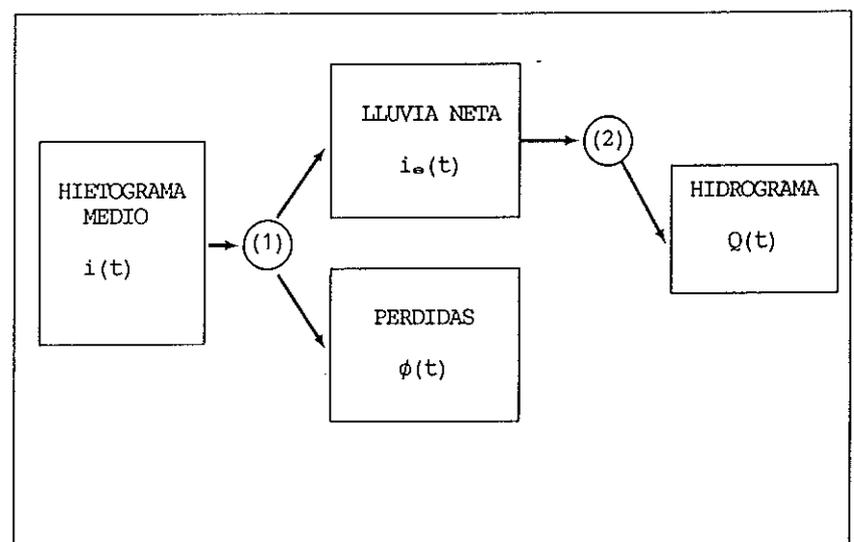


Figura 1. Diagrama de las componentes que integran el modelo conceptual

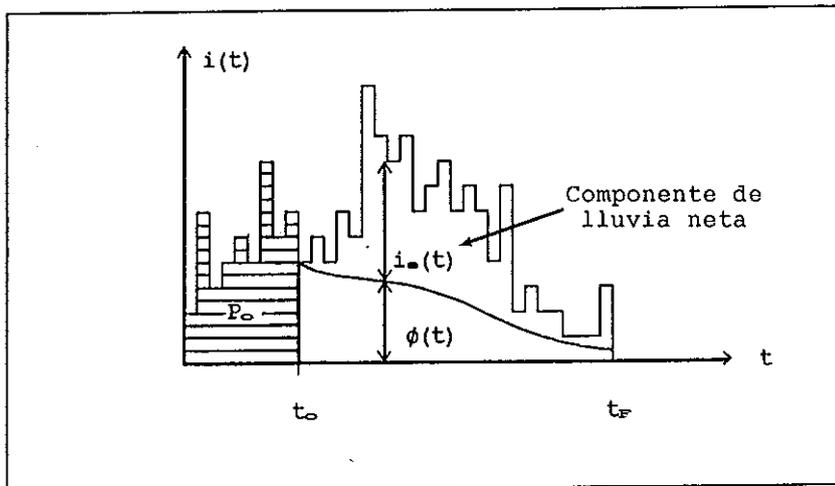


Figura 2. Segregación de la componente neta o de escorrentía superficial directa a partir del hietograma medio.

$$E(t) = \begin{cases} 0 & \text{para } P \leq P_0 \\ \frac{[P(t) - P_0]^2}{P(t) + 4P_0} & \text{para } P > P_0 \end{cases} \quad [2]$$

siendo:

$E(t)$ = Componente de escorrentía, o lluvia neta acumulada hasta el instante 't' (medio desde el comienzo del chaparrón).

$P(t)$ = Lluvia total acumulada hasta el instante 't'.

Esta aproximación puede fácilmente reformularse en términos de las funciones $i_e(t)$ y $i(t)$, ya definidas. En efecto, de acuerdo con el esquema de la figura 2, se obtienen las ecuaciones [3], [4] y [5].

siendo:

A = Área de la cuenca

$i_e(t)$ = Componente de intensidad de lluvia neta

$u()$ = Hidrograma instantáneo unitario, o respuesta de la cuenca cuando el INPUT es un chaparrón teórico de volumen neto unitario y duración tendente a cero.

Esta simple conceptualización del fenómeno define un interesante marco para incorporar toda una variedad de hipótesis, y de ahí su principal interés práctico. Lógicamente, el éxito de la aplicación dependerá en gran medida de la correcta elección de las funciones mencionadas y de la estimación de sus parámetros. Por otro lado, es importante reseñar que la utilización de este esquema queda restringida a cursos de circulación efímera, cuyos caudales base apenas contribuyen al volumen y pico de crecida.

2.1. El modelo de pérdidas

Para representar las pérdidas se ha adaptado la curva propuesta por el USSCS (Soil Conservation Ser-

vice) de los EEUU (en TEMEZ, 1978).

Dicho organismo propone una función de un solo parámetro, sínte-

$$P(t) = \int_0^t i(t)dt; \quad P_0 = P(t_0) = \int_0^{t_0} i(t)dt \quad [3]$$

$$i_e(t) = \begin{cases} 0 & \text{para } t \leq t_0 \\ \frac{dE(t)}{dt} = i(t) \frac{[P(t) - P_0][P(t) + 9P_0]}{[P(t) + 4P_0]^2} & \text{para } t > t_0 \end{cases} \quad [4]$$

$$\phi(t) = i(t) - i_e(t) \quad [5]$$

sis del proceso físico de absorción de agua. Dicho proceso es entendido por fases: En la primera fase, desde el comienzo de la lluvia hasta el momento de iniciarse la escorrentía, el suelo absorbe las cantidades precipitadas, hasta un valor límite P_0 , o umbral de escurrimiento. Alcanzado este valor, las sucesivas cantidades registradas sólo son absorbidas en parte, produciendo una componente de escorrentía directa superficial que pasa a circular por la red. Esta fracción de escorrentía generada sigue la ley:

El coeficiente de escorrentía global C , o fracción de la lluvia recogida que produce escorrentía directa de superficie, puede obtenerse como:

$$C = \frac{E(t_F)}{P(t_F)} = \frac{[P(t_F) - P_0]^2}{[P(t_F) + 4P_0] P(t_F)} \quad [6]$$

Esta fórmula se utilizó para estimar P_0 en el caso práctico que se presenta, dado que C se conocía a priori, a partir de los volúmenes totales de escorrentía y precipitación registrados.

Si no es factible recurrir al balance hídrico, Po puede estimarse en base a las tablas recomendadas por la USSCS para los distintos tipos de suelos, o bien mediante experimentos de infiltración realizados en la zona objeto de estudio.

Interesa destacar que otras hipótesis sobre el proceso de infiltración, componente principal de las pérdidas, que conduzcan a la definición final de una función (t), tienen cabida en el esquema operativo que se propone. De esta manera, otras funciones, como las compuestas por PHILIP (1957) o HORTON (1945), descriptoras de la variación de la capacidad de infiltración de los suelos con el tiempo, pueden ser recomendables, según el comportamiento observado en ellos. En cada caso, el número de parámetros a estimar debe ser acorde con la naturaleza de la información disponible. Si los datos sobre infiltración son pobres, como sucede con frecuencia, es aconsejable una aproximación como la del USSCS, con un único parámetro.

2.2 El modelo de transformación lluvia neta-escorrentía

La operación de transformación lluvia neta - escorrentía consiste en la ya mencionada transformación lineal, siendo la función de Green del sistema o función impulso-respuesta el hidrograma unitario instantáneo (HUI) de la cuenca.

El HUI debe contener la información necesaria de la cuenca, y su adecuada definición exige:

- a) Una expresión funcional, que facilite su manejo numérico.
- b) Representar una forma que se adapte bien a los hidrogramas observados.

La función u(t) aquí utilizada reúne ambas condiciones. Propuesta por Nash (1957), es la función gamma de dos parámetros. También se conoce en la bibliografía como modelo conceptual de Nash, que equipara la cuenca con una cascada de embalses lineales.

$$u(t) = \frac{t^{\alpha-1} \text{EXP}(t/k)}{k^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \quad [7]$$

siendo:

α = Parámetro de forma

k = Parámetro de escala

Γ = Función gamma

Nuevamente, debe señalarse en este punto la posibilidad de incorporar toda una variedad de hidrogramas unitarios propuestos en la bibliografía, inclusive una función uniforme de tiempo base igual al tiempo de concentración de la cuenca. Este caso representa precisamente la generalización del método racional en el marco de la teoría lineal (SINGH y CRUISE, 1989). Como se comprobará, el hidrograma de Nash demuestra ser especialmente indicado para el suceso potencialmente analizado. En cuanto a la determinación de α y k, ROSSO (1984) propone estimar dichos parámetros sobre la base de índices morfométricos de la cuenca, según las fórmulas:

$$\alpha = 3.29 \left[\frac{Rb}{Ra} \right]^{0.78} Rl^{0.07} \quad [8]$$

$$k = 0.70 \left[\frac{Ra}{RbRl} \right]^{0.48} L/v \quad [9]$$

siendo:

α = parámetro de forma

k = parámetro de escala

Rb = relación de bifurcación

Ra = relación de área

Rl = relación de longitud

L = longitud media de los cauces de orden superior

v = velocidad media de la corriente

Tal aproximación permite incorporar las características físicas de la red de drenaje en la formulación del modelo, al definir la forma del HUI a partir de los ratios de HORTON (1945). Este tipo de hidrogramas unitarios, parametrizados en función de características geomorfológicas de la cuenca, son los llamados hidrogramas unitarios geomorfológicos (RODRIGUEZ ITURBE y VALDES, 1979), uno de los cuales es el hidrograma de Rosso, utilizado en el caso que se analiza.

3. APLICACION

La aplicación del hidrograma unitario geomorfológico se llevó a cabo en la Rambla de Poyo (Valencia) para la crecida ocurrida el día 11 de noviembre de 1988.

3.1. Características físicas de la cuenca

La Rambla de Poyo constituye un curso de agua efímero localizado inmediatamente al sur del Turia. Tiene su origen en las sierras de los Bosques y de la Cabrera, a partir de las cuales se organiza, siguiendo una dirección ibérica NW-SE, en tres cauces principales: el barranco Grande, el de la Cueva Morica y la Rambla de Gallo-Chiva (Fig 3). Tras la triple confluencia toma el nombre de Rambla de Poyo, para acabar desembocando en la Albufera de Valencia bajo el nombre de Barranc de Torrent. No obstante sólo se considerará aquella parte de la cuenca controlada por la estación de registro foronómico, cuya extensión es de 187 km².

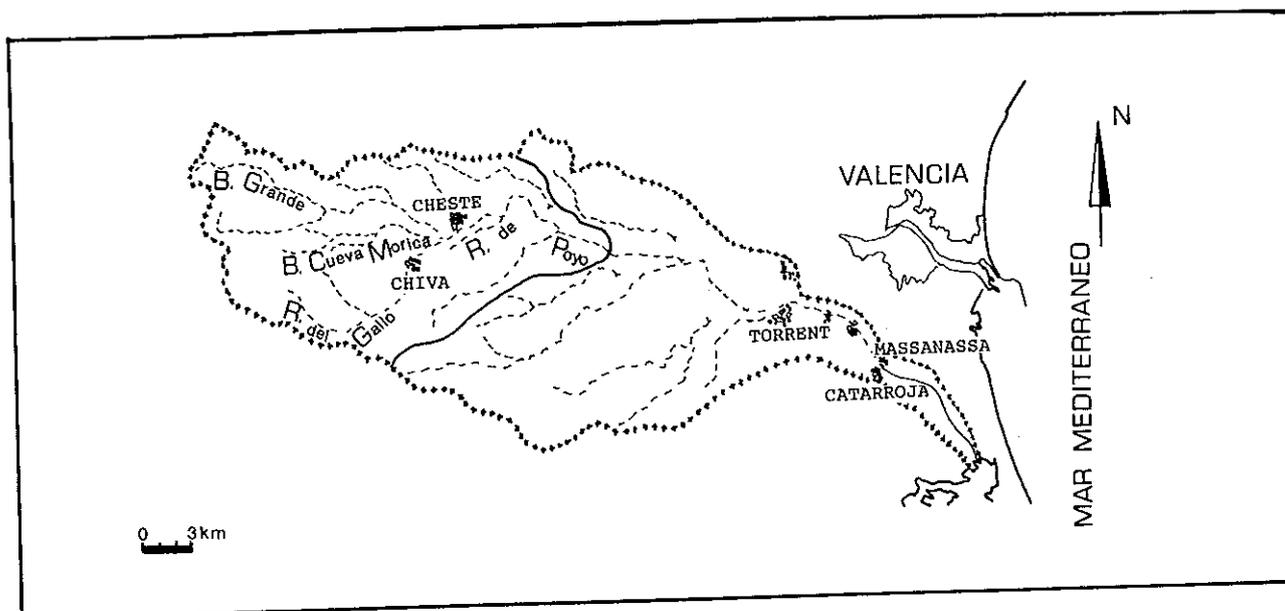


Figura 3. Localización de la zona de estudio.

Esta subcuenca presenta una topografía muy contrastada, con fuerte control estructural (BRINKMANN, 1931; PARGA, 1969; VEGA, 1978) e importante actividad neotectónica.

Geomorfológicamente se distinguen tres unidades que de oeste a este son las siguientes:

- a) La zona montañosa de cabecera situada en el sector occidental. Se instala sobre materiales resistentes calizo-dolomíticos y conforma un relieve germánico dispuesto en gradería.
- b) Un sector hundido intramontano relleno de depósitos cuaternarios en el que se instalan los tres lechos principales: el Barranco Grande, el de la Cueva Morica y la Rambla de Gallo-Chiva. Dentro de este sector, elementos geomorfológicos tales como conos torrenciales y barras de canal, describen un funcionamiento de crecida de tipo flash flood (DURAN et al., 1985), al tiempo que existen otros componentes, como una plataforma colgada entre Buñol y Chiva, o diversos espa-

cios de drenaje deficiente en el corredor Buñol-Chiva-Cheste, que constituyen auténticas zonas de laminación y mitigación de las avenidas.

- c) Por último, el sector oriental, de relieve subtabular, está integrado por materiales margo-arcillosos muy desmantelados y presenta ligeros basculamientos que ponen de manifiesto una importante actividad neotectónica. Sobre este sector se desarrollan gran número de cauces de fondo plano.

En cuanto a la red de drenaje, se trata de una red subdentrítica (ZERNITZ, 1977) de orden 5, según el sistema de jerarquización de Horton-Strahler. Morfométricamente está caracterizada por bajas relaciones de bifurcación ($R_b = 3.18$), de longitud ($R_l = 1.8$) y de elongación ($R_e = 0.39$), lo cuál favorece la rápida concentración de caudales. Por otra parte, presenta baja densidad de drenaje ($D_d = 1.02 \text{ Km/Km}^2$) que preconiza flujos en ladera retardados. Además, la red muestra una deficiente organización de su trazado exorreico, así como una influen-

cia antrópica considerable. De hecho parte del cauce principal de la Rambla del Gallo ha sido excavado artificialmente y la mayoría de los barrancos de fondo plano se han acomodado para el cultivo.

3.2. Simulación del hidrograma de crecida del día 11 de noviembre de 1988

La crecida registrada en el día 11 de noviembre de 1988 fue provocada por precipitaciones de fuerte concentración horaria desencadenadas por una clásica situación sinóptica de «gota fría». El volumen total de lluvia bruta (registrado entre las 6:05 y las 21:45 del día) fue de 13.98 Hm^3 , llegando a alcanzar una intensidad máxima de 96 mm/h , a las 19:30 h. La figura 4 muestra el hietograma medio observado. En ella se comprueba las sustanciales variaciones que experimenta la intensidad de precipitación en el tiempo, con unas marcadas puntas, decisivas en la generación de la crecida registrada. En concreto, prácticamente la totalidad del hidrograma observado (fig. 5) se debe a las aportaciones provocadas por el

HIETOGRAMA REGISTRADO EL 11-NOV-88 (RAMBLA DE POYO)

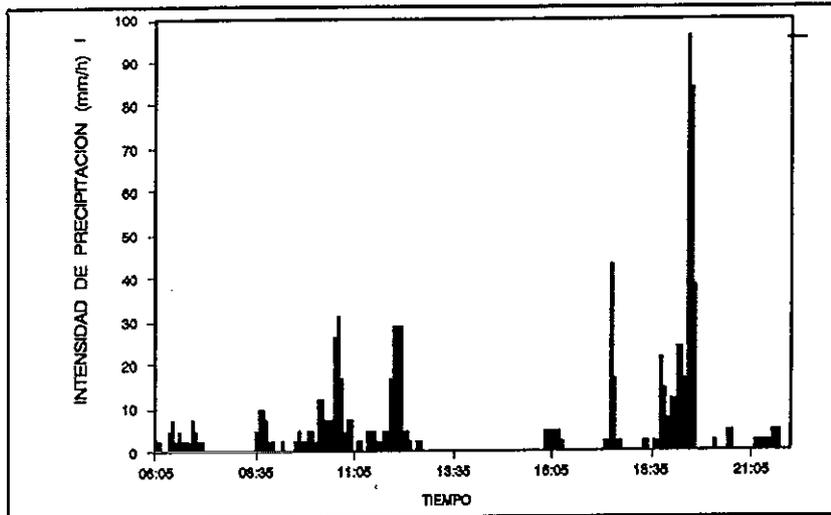


Figura 4. Hietograma medio registrado durante el día 11 de noviembre de 1988.

intervalo de lluvia comprendido entre las 17:25 y las 19:40 horas.

La metodología de cálculo descrita ha sido aplicada para la estimación teórica del hidrograma a partir de los datos de precipitación. Los parámetros utilizados para ello, estimados según los procedimientos citados, son los siguientes:

$$\alpha = 2.79 \quad (R_a = 4.26; R_b = 3.18; R_l = 1.8 \text{ y } L/v = 47 \text{ min})$$

$$K = 27.80 \text{ min}$$

$$P_0 = 38 \text{ mm}$$

$$A = 187 \text{ km}^2$$

Dichos parámetros permiten definir completamente las funciones t y $u(t)$ y aplicar, por lo tanto, las operaciones (1) y (2) para realizar la transformación $i(t) \rightarrow Q(t)$.

La estimación del parámetro de escala k , así como la resolución numérica de la ecuación de convolución, se han realizado siguiendo a CARONI *et al.* (1986).

El resultado $Q(t)$ obtenido se presenta en la figura 5, donde puede observarse que el máximo caudal aparece subestimado en un 6% respecto del pico realmente registrado.

En cuanto a la distribución en el tiempo de los caudales, se comprueba que ésta se adapta con buena aproximación a la del hidrograma observado.

El contraste es claramente satisfactorio en este caso, permitiendo identificar la respuesta unitaria de la cuenca con el HUI de Nash. No obstante dicho HUI, y por lo tanto la validez de la hipótesis lineal en la transformación lluvia neta-escurrentía, deberá ser contrastado me-

diante el análisis de futuros sucesos en la misma cuenca.

4. CONCLUSIONES

La metodología utilizada para la estimación del hidrograma producido por un chaparrón en una pequeña cuenca muestra un buen ajuste con el hidrograma observado. Basada en la clásica teoría del hidrograma unitario instantáneo.

El caso abordado pone de manifiesto el interés que revisten los estudios de carácter geomorfológico en la cuantificación de caudales y estimación de los hidrogramas de crecida, tanto desde el punto de vista práctico como en el plano teórico, donde la profundización en los mecanismos físicos intervinientes resulta imprescindible. Esta necesidad de incorporar parámetros de base geomorfológica en los modelos de predicción hidrológica, se hace especialmente patente si tenemos en cuenta la habitual escasez de datos.

En ausencia de leyes universales y métodos generales a aplicar de

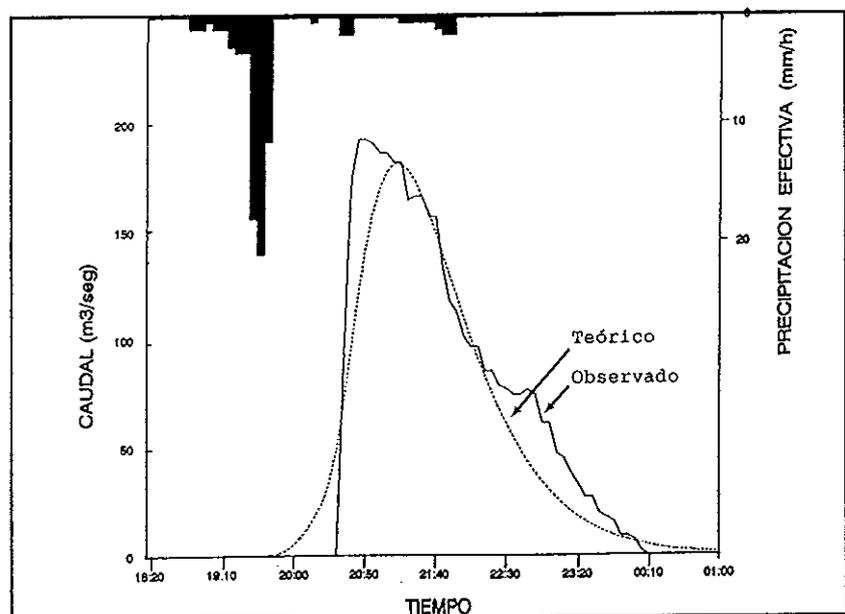


Figura 5. Hidrogramas correspondientes a la crecida del día 11 de noviembre de 1988.

modo sistemático en este tipo de problemas, un conocimiento de las herramientas y modelos disponibles permite la adecuación de uno u otro procedimiento a las circunstancias concretas de cada suceso hidrológico o cada entorno climático y geomorfológico. En este sentido, la teoría lineal ofrece un marco conceptual que admite diversas aproximaciones e hipótesis de trabajo para abordar la estimación del hidrograma de crecida a partir de las precipitaciones.

BIBLIOGRAFIA

BRINKMANN, R. (1931): «*Betikum und Keltiberikum in Südospanien*». Trad. al español en 1948 por J. Gómez de Llarena con el título: «*Las Cadenas Béticas y Celtibéricas del Sureste de España*», en Publ. Extr. Geol. España, 4 pp. 305-431.

CARONI, E. et al. (1986): «*Non-linearity and time-variance of the hydrologic response of a small mountain Creek*», en Scale Problems in Hydrology. Runoff generation and basin response.

DOOGE, J.C.I. (1959): «*A general theory of the unit hydrograph*», J. Geophys. Res., 64 (2), pp 241-256.

DURAN, J.J. et al. (1985): «*Geología y prevención de daños por inundación*. Madrid. Instituto Geológico y Minero, 421 pp.

HORTON, R.E. (1945): «*Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysi-cal approach to quantitative morphology*», Bull Geol. Soc. Amer., vol. 56, pp 275-370.

JOHNSTONE, D. y CROSS, W.P. (1949): «*Elements of applied hydrology*, New York, 276 pp.

NASH, J.E. (1957): «*The form of the instantaneous unit hydrograph*», General Assembly of Toronto, Internatl. Pub 42, Compt. Rend. 3, pp 114-118, Gentbrugge.

PARGA, J.R. (1969): «*Spatvariszische Bruchsysteme im Herperischen Massiv*», Geol. Rodsch., T. 59, pp 323-336.

PHILIP, J.R. (1957): «*The theory of infiltration I-the infiltration equation and its solution*», Soil Sci. 83(5), pp 345-357.

RODRIGUEZ-ITURBE, I. y VALDES, J.B. (1979): «*The geomorphological structure of hydrologic response*», Water Resour. Res., 15(6), pp 1409-1420.

ROSSO, R. (1984): «*Nash model relation to Horton order ratios*», Water Resour. Reser., vol 20, no 7, pp 914-920.

SHERMAN, L.K. (1932): «*Streamflow from rainfall from the unit hydrograph method*», Eng. News Record, 103, pp 501-505.

SINGH, V.P. y CRUISE, J.F. (1989): «*A note on the rational method*». En Channel flow and catchment runoff, Proceedings of the International Conference for Centennial of Manning's Formula and Kuichling's Rational Formula.

TEMEZ, J.R. (1978): «*Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*, MOPU Dirección General de Carreteras, 113 pp.

ZERNITZ, E.R. (1977): «*Drainage Patterns and their significance*», en Drainage Basin Morphology, Schumm (ed.). Pennsylvania, pp 45-68.